

半導体レーザの自己結合効果を用いた微小変位センサの研究

Study on micro displacement sensor using self-coupling effect of semiconductor laser

山田 浩之† , 津田 紀生†† , 山田 諄††

Hiroyuki Yamada , Norio Tsuda , Jun Yamada

Abstract Recently, using self-coupling effect of semiconductor laser, a compact distance or vibration meter has been studied. In this work, a new type of micro displacement sensor using self-coupling effect of semiconductor laser is studied. The displacement more than $1/2$ wavelength can be measured from the peak number of interference output by self-coupling effect. To measure the displacement below $1/2$ wavelength, this sensor is made from a movable structure. Adding micro vibration of 6KHz to the sensor and adjusting DC bias voltage applied to the sensor, a displacement of the sensor is controlled so that the vibration output becomes a maximum value. When the target displaces, it is again controlled to get a maximum vibration output. The micro displacement of the target is measured from the sensor displacement. It is found that the micro displacement can be measured with resolution power of several 10 nm.

1. はじめに

現在、光学と電子工学が融合した光エレクトロニクスの分野は急速に発展してきており、光通信、光電変換などのシステムやレーザ、発光ダイオード(LED)、光ファイバーなどの光デバイス、シリコンや液晶の材料など計測機器、医学機器、工作機器、エネルギー関連機器、情報関連機器などのさまざまな分野まで広がっている。

これらの様々な分野の発展に重要なものはレーザであり、1960 年代にレーザが初めて発振し、コヒーレントな光がつくられるようになり、1970 年代には連続発振が可能な半導体レーザがつくられた。今日では固体レーザ、液体レーザ、気体レーザ、半導体レーザなどに種類が増えた。特に半導体レーザは小型で軽量であり、高利得、高効率であり、印加電流を変調することで簡単にレーザ光の周波数や出力を制御できるため本研究でも使用した。

半導体レーザによる自己結合効果を用いた研究は幅広

く行われており、1m 程度の距離を測定するための自己結合型距離計¹⁾や微小振動を測定する自己結合型微小振動計²⁾など多くの計測で利用されている。本研究では、微小振動測定で使用している自己結合効果の理論を応用して、小型で軽量な高分解能をもつ自己結合効果型微小変位計の原理を確認するため、測定装置を作製し、手動測定でその性能を調べた。

現在、半導体集積回路の細線化も進み、使用される線幅も 40nm 以下になってきており、MEMS やフォトニクス結晶などのナノ構築物も作られるようになってきた。近い将来にこれらが大量生産されるようになると生産現場でナノオーダーの分解能を持ち動作範囲が広く、小型で安価な微小変位センサが必要になる。従来の非接触式の変位計は、渦電流式や三角測量を用いたレーザ変位計などがあるが、分解能は数 μm 程度しかない。静電容量式変位計は、数 nm 程度の高い分解能を持つが、動作範囲が数十 μm 以下と短く、測定対象物が金属のみであり、プローブ径の平均値しか分からない。レーザヘテロダイン式変位計は数 nm 程度の分解能はあるが外部振動に弱く、装置が大型で高価であり、生産現場のセンサとして使用するには不向きな点がある。

本研究では、半導体レーザによる自己結合効果を用いることで分解能が数十 nm 程度と高く、原理的に動作範

† 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科
電子工学専攻 (豊田市)

囲が制限されず、外部振動に強く、小型で安価な生産現場で使用されやすい微小変位センサの開発を目指す。

2. 測定原理

2-1. 自己結合効果

半導体レーザの特徴として高い可干渉性をもち、外部共振器を必要とせず半導体レーザ内の共振器を用いるという点がある。半導体レーザから放出された光が外部反射面で反射され、一部の反射光が半導体レーザの共振器内に戻ってくる。これにより出力光と一部の反射光による戻り光が干渉することで本来の出力のときに比べ出力に変化が生じる。この出力の微小な変化を戻り光ノイズと呼ぶ。この戻り光ノイズによる半導体レーザの出力の変化は、出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} 程度と極めてわずかであっても顕著に現れる。この理由として、半導体レーザ内の共振器で出力光と戻り光の干渉が共振条件を満たすことで生じる増幅作用により従来の出力以上の変化となるためである。この現象は、今までノイズとして扱われてきており、多くの技術では除去するほうに力をいれてきていた。しかし、本研究では、この現象を自己結合効果として利用することで微小変位測定に応用した。自己結合効果を利用することにより使用するセンサ部が半導体レーザと集光レンズのみとなるのでセンサ部を小型にすることができ、僅かな光の変化も顕著に現れるため微小な変位も測定可能である。

本研究で用いる自己結合効果について図 1 に示す。

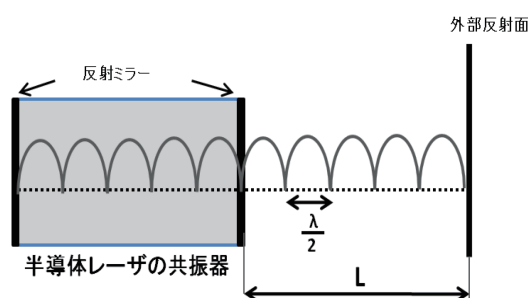


図 1 自己結合効果

半導体レーザを発振させ、集光したレーザ光を測定対象物に照射する。測定対象物に照射されたレーザ光が反射、散乱し、一部の反射光がレーザ共振器内に戻り、戻り光と出力光が干渉することで光出力が増減することを自己結合効果と呼ぶ。半導体レーザの出射面から測定対象物までの距離を L 、半導体レーザの発振波長を λ とした共振条件

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n ; \text{整数}) \quad (2.1)$$

を満たすときに最大出力となる。これを利用してレーザの発振波長の $1/2$ 波長ごとの分解能で変位が測定可能になる。

2-2. 微小変位測定の原理

微小変位測定の原理について説明する。自己結合効果で説明した距離 L が $1/2$ 波長以上変化するとレーザ出力は正弦波的变化をする。共振条件により $1/2$ 波長ごとにピークが現れるので、ピークの数から $1/2$ 波長の分解能で変位が測定可能である。一方、 $1/2$ 波長以下の変位測定も正弦波補正などで求めることができる。しかし、 $1/2$ 波長以下の場合の自己結合効果によって発生した出力は戻り光量によって変化するので不安定な測定方法になる。

そこで、センサ部を可動する構造にし、センサ部に微小振動を加え、振動の中心と測定対象物までの距離を変化できるようにした。測定対象物に変位したときの干渉出力波形に 6KHz の微小振動がのっている図を図 2 に、2 つに分解した図を図 3 に示す。図 3(a) は測定対象物の変位による干渉出力波形を、図 3(b) は 6KHz の微小振動を示す。

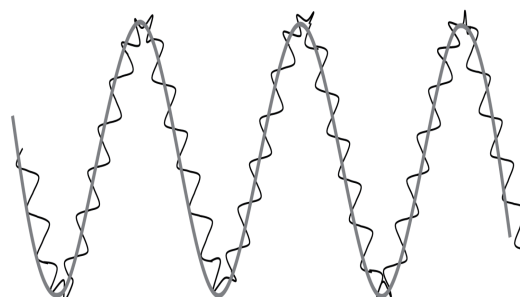


図 2 自己結合効果の干渉出力波形

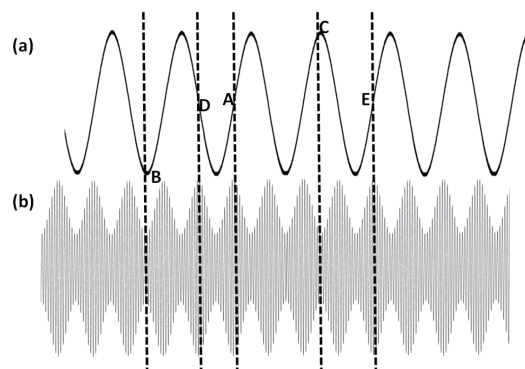


図 3 (a) 干渉出力波形 (b) 振動出力

半導体レーザの自己結合効果を用いた微小変位センサの研究

図 3(a)の出力干渉波形は正弦波のため、中央の傾きが最も大きくなる。正弦波中央の A 点を中心に振動させているので、A 点が正の最大振動出力である。B 点、C 点は正弦波の傾きのゆるやかな点なので振動出力も小さくなる。また、D 点は A 点の逆位相のため負の最大振動出力である。このことから、常に正の最大振動出力である A 点に制御できれば、測定対象物の反射率や光軸の変化による戻り光量に関係なく変位量を測定できることがわかる。これより、あらかじめ直流バイアスの変化量からセンサ部の変位量がわかるようにしておくことで、測定対象物が変位したとき A 点に制御されていればセンサ部の移動量から測定対象物の変位や変位方向が測定できる。しかし、センサ部の移動量が数十 μm 以上であるとき nm 程度の分解能は難しくなる。そこで、センサ部の移動量を一波長程度にしておき、測定対象物が 1/2 波長以上変位した場合、E 点又は幾つかのピークを越えたあとの正弦波の中央でプラスからマイナスになる点で静止させる。これよりピークの数とセンサ部の移動量から正確な変位量を測定できる。

3. 測定装置

3-1. 測定装置概要

本研究で測定に用いた手動測定装置の概略図を図 4 に示す。実験装置は、半導体レーザ(LD)と集光レンズのみで構成されているセンサ部と発振回路や圧電素子駆動回路を用いているセンサ駆動部、LD の出力の処理を行う電子回路部、ターゲットの 4 つに分かれている。

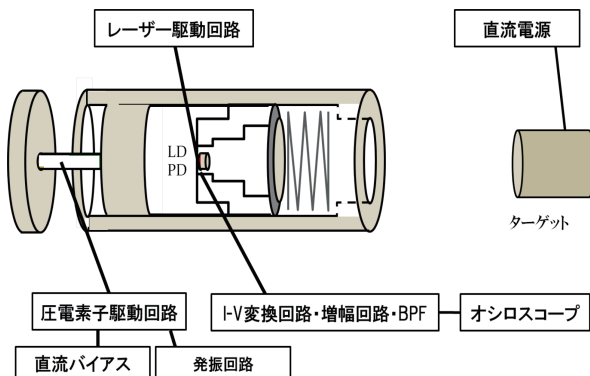


図 4 測定装置概要

測定装置の動作方法として、発振回路を用いて常に 6KHz の微小振動を加えてあり、半導体レーザにレーザ駆動回路を用いて定電流を供給する。半導体レーザを発振させて、集光レンズで集光させたレーザ光をターゲットに照射する。ターゲットに照射された光が反射、散乱を

起こして一部の散乱光が半導体レーザの共振器内に戻り、自己結合効果による出力変化をフォトダイオード (PD) で検出する。検出した出力を I-V 変換回路を通して電圧にし、増幅回路を用いて増幅し、バンドパス回路を通して必要な振動出力である 6kHz を取り出し、オシロスコープで波形を表示する。

3-2. センサ部

本研究で用いたセンサ部の概略図を図 5 に示す。研究で用いたセンサ部は直径 13.9mm、長さ 40mm の円筒型構造になっており、センサ部に使用した材料は強度があり、加工しやすい点を考慮して真鍮を用いた。センサ部内には集光レンズと半導体レーザのみが配置されており、半導体レーザは OPTEK TECHNOLOGY 社の波長 850nm の OPV310 を使用している。レーザ駆動回路を用いて 3.25mA の定電流を供給して半導体レーザを光出力 1.0W で発振させ、集光レンズ(直径 10mm、レンズの焦点距離 10mm)の平凸レンズを使用しており、27.4mm 先に集光させている。半導体レーザと電子回路を繋ぐ線にはシールド線を用いてあり、誘導発振などのノイズの影響を受けないようにしてある。

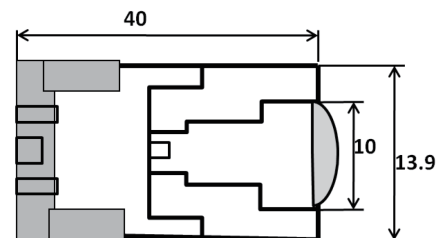


図 5 センサ部

3-3. センサ駆動部

前述したセンサ部を黒色で表し、センサ駆動部は直径 26mm、長さ 65mm の真鍮製であり、センサ部を収める二重円筒構造になっている。センサ駆動部の概略図を図 6 に示す。後方には灰色で示した駆動用の圧電素子を配置、

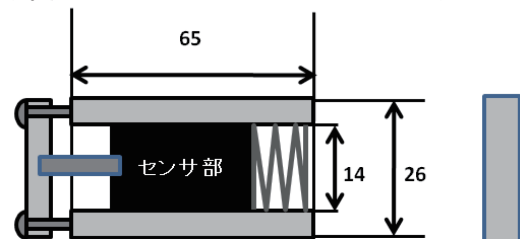


図 6 センサ部

それを圧電素子固定部とネジ(M3)を用いて固定してある。後方の圧電素子固定部をネジで調整することで感度の微調整をすることが可能である。

3-4. 回路部

LD駆動回路は半導体レーザを発振させるのに必要な安定した電流を供給するために定電流回路を使用する。回路の電流を決める抵抗を可変抵抗にすることで比例的に電流をある程度の範囲まで変化させることができる。これは使用する半導体レーザの個体差より電流による出力の変化が起こるため抵抗を変化できるようにした。

圧電素子駆動回路はセンサ部に微小振動と変位を与えるために用いた回路である。トランジスタ 2SC1815 と抵抗を用いた回路で、発振回路からの正弦波出力を増幅させる。圧電素子を変位させるために直流バイアスが必要になるので直流電源からの直流バイアス(0-50V)を出力と共に圧電素子に印加する。

発振回路は測定装置に常に安定した微小振動を与えるために発振回路を使用する。使用した回路は株式会社秋月電子通商社のダイレクトデジタルシンセサイザー(DDS)キットを使用している。オンボードディップスイッチを切り替えることで簡単に出力周波数を変更できる。

I-V 変換回路とは、フォトダイオードから検出される僅かな自己結合効果の出力が電流であるため電圧に変換するための回路である。そこで本研究では、FET(2SK30A)とオペアンプ(LF356)の複合回路を作製して使用した。FET とオペアンプの I-V 変換回路は、FET を用いることで電流でなく電圧で動作させられるので、微弱な入力も検出することができ、フォトダイオードにかける電圧も大きくできる。しかし、FET のみでは増幅度が小さいため、オペアンプを追加してその欠点をカバーした。

次に I-V 変換回路により電圧に変換した自己結合効果の出力は、測定に用いるには、小さな出力のため増幅する必要がある。そこでオペアンプを用いて負帰還型の増幅回路を作った。今回は増幅度を 600 倍にしたため 1 つの増幅器では、増幅度が安定しないため 3 つに分割して安定して増幅できるようにしてある。増幅回路に用いたオペアンプは LF356 を使用している。

次に、自己結合効果の出力は外部からのノイズや装置自体から出るノイズなど多くのノイズが付加されてしまい必要な出力を正確に検出するのが難しくなる。そこで 1/2 波長以下の変位を測定するためにバンドパスフィルタ(BPF)回路を用いて必要な出力を検出した。今回は 6kHz の微小振動を得るために中心周波数を 6kHz に設定してこの周波数以外の出力を減衰するようにしてある。

BPF 回路に使用した素子は、抵抗のみで簡単に遮断周波数を変更でき、周波数精度も 3%以内、ひずみ率 0.01%と高性能な NF Corporation 社の SR-2BP を使用している。

3-5. ターゲット

センサの駆動とターゲットとして用いたアクチュエータの説明をする。積層圧電アクチュエータとは、圧電効果を利用して電気エネルギーを変位や力などの機械的なエネルギーに変換するセラミック素子のことである。

センサ部に用いたアクチュエータは NEC/TOKIN の AE0203D16 であり、ターゲットに用いたのは同社の金属ケース封入型アクチュエータの ASB170C801NP0 である。この圧電アクチュエータは、従来の圧電アクチュエータに比べて小型・低電圧で大きな変位や力を発生することができる。

4. 測定方法

本研究では、測定対象物の変位が 1/2 波長以内であるときの測定方法について説明する。センサ部には常に 6kHz の振動を加えてある。初めにセンサ部の圧電素子に直流バイアスを印加させることでセンサ部を移動させ、振動出力が最大になるようにする。次にターゲットに直流バイアスを印加してターゲットを変位させる。ターゲットが変位することで最大振動出力の条件を満たすことができなくなり、振動出力が小さくなる。最後に再度、センサ部の圧電素子に直流バイアスを印加させて振動出力が最大になるようにセンサ部を移動させる。これよりターゲットの変位前の最大振動出力状態から変位後の最大振動出力状態のときの圧電素子に印加された直流バイアスの変化量が測定できる。あらかじめ、直流バイアスの変化量からセンサ部の移動量を求めておけばターゲットの変位量を算出することができる。振動出力の変化過程を図 7 に示す。

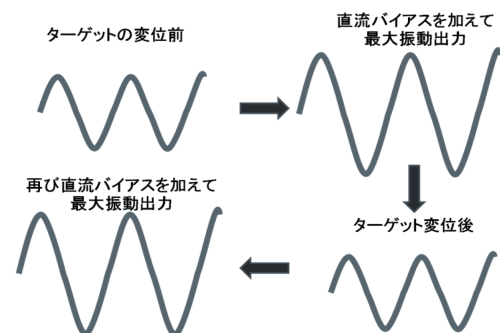


図 7 振動出力の変化過程

5. 測定結果

5-1. 静電容量式変位計

岩通計測株式会社の分解能 5nm の静電容量式変位計 ST-3571A とプローブ ST-0705A を用いて測定したターゲットの変位を図 8 に示す。ターゲットを 0~6V の範囲で電圧を変化させて電圧の変化を測定する。5 回測定を行い、0V 時の電圧にゼロを基準とするように補正し、静電容量式変位計の出力電圧を平均化して出力を求めた。

図 8 から見られる電圧の上昇時と下降時での変位の違いは、ターゲットに使用している圧電素子のヒステリシス効果によるものと考えられる。

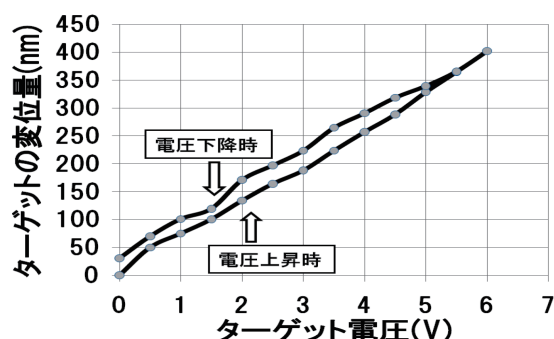


図 8 静電容量式変位計によるターゲットの変位

5-2. 微小変位センサの測定結果

本研究で作製した微小変位センサの結果について説明する。測定では、ターゲットに印加する電圧を 0~6V に変化させ、最大振動出力になるように直流電源からセンサ部圧電素子の直流バイアスを印加し、オシロスコープを用いて測定した。測定は、5 回行ってどのような変化が起こっているかを観測した。微小変位センサの測定結果を図 9 に示す。図 9 の 5 回測定した結果は、両方ともややずれがあるものの同じ傾向になっていることが読み取れる。

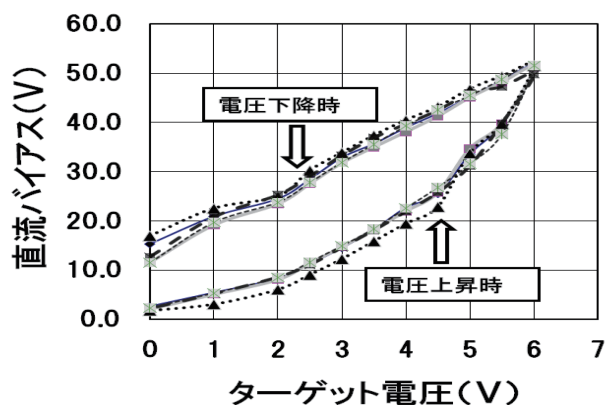


図 9 微小変位センサの測定結果

次にばらつき誤差について説明する。今回の変位測定に使用する値は数字の信憑性を得るために平均値を用いている。しかし、複数測定することで多少なりに変化が生じる。そこで、測定したセンサ部圧電素子への直流バイアスの平均値と 1~5 回の誤差をだして、さらに平均した値を求めて、測定値の分解能を確認した。ばらつき誤差の数値を確認してみるとばらつき誤差が 5%以上の点も多数存在する。これは手動測定する測定者によって異なる個人差や外部からのノイズが原因である。また、ターゲットに印加する電圧が 0V 付近の時は、ばらつき誤差が大きくなっている。これは、センサに用いている圧電素子の分子分極が不規則になっているためである。また電圧上昇時 2V から電圧下降時 2V に戻るまでのばらつき誤差は、ほとんど 5%以内とかなり安定していた。図 10 にばらつき誤差の変化を示す。ばらつき誤差の総合平均結果として 4.67%となっている。

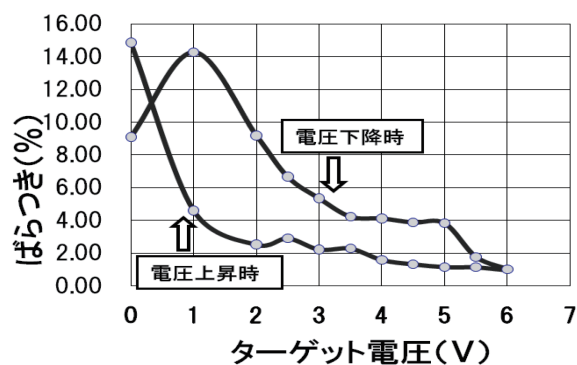


図 10 ばらつき誤差

次に変位を求めるのに基準にする出力干渉波の最大振動出力時のセンサ部圧電素子の直流バイアスの平均値を図 11 に示す。

これにより、ターゲットの変位に対しての最大振動時のセンサ部圧電素子の直流バイアスが分かる。

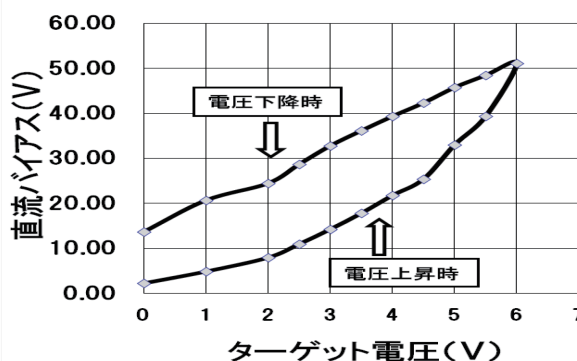


図 11 ターゲット電圧に対するセンサ部圧電素子の直流バイアス

これらの図 11 と図 8 の静電容量式変位計によるターゲットの変位からセンサ部圧電素子の直流バイアスに対するセンサ部の移動量が求められることが可能である。図 12 に算出した直流バイアスに対するセンサ部の移動量を示す。この図から手動測定でも数十ナノメートル程度の分解能で測定可能であることが分かった。

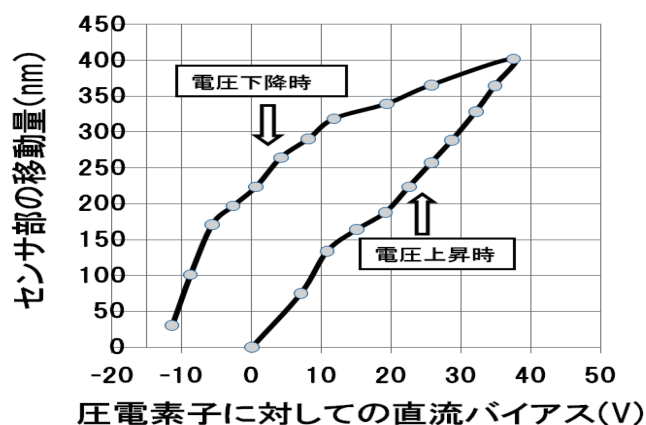


図 12 センサ部圧電素子の直流バイアスに対する
センサ部の移動量

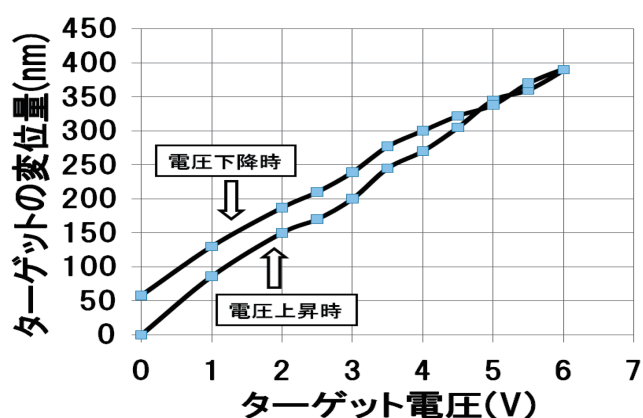


図 13 測定結果

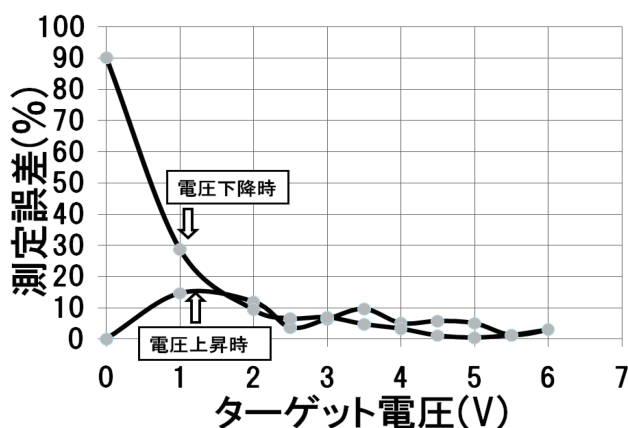


図 14 測定誤差

次に、図 12 を用いて本研究で試作した装置で測定したターゲットの変位量の測定結果を図 13 に示す。自己結合型微小変位センサにより測定されたターゲット変位量の測定結果は静電容量式変位計で得られた図 8 の結果に近い値が得られた。図 8 の静電容量式変位計の測定結果を真値にし、図 13 と比較した測定誤差を図 14 に示す。平均測定誤差は約 10%になっている。

9. まとめ

半導体レーザを用いて、従来はノイズと認識されていた戻り光ノイズを光出力の増減を共振条件でコントロールすることで自己結合効果として利用することができるようになり、半導体レーザとレンズのみといった簡単な装置で微小変位の測定を行えるようになった。

本研究では、測定原理の確証を得るため、測定対象物が 1/2 波長以内の測定できる測定装置を作製し、その特性について研究を行った。

測定対象物を変位させて半導体レーザの出力をフォトダイオードで検出すると出力は正弦波的に出力する波形になる。この波形から 1/2 波長ごとにピークがあることがわかった。しかし、これだと 1/2 波長の分解能で変位を測定することができるが 1/2 波長以内の変位を測定することができない。そこで装置のセンサ部を可動式にすることで 1/2 波長以内の変位を測定できるようにした。測定装置自体に発振回路を用いて微小振動を加えており、振動出力が最大になるように制御することで光軸の変化による戻り光の変化や反射率の違いによる変化に関係なく基準となる点を確認することができ、これにより最高の感度で変位を測定することが可能となった。本研究では半導体レーザを用いて自己結合効果を利用することで、従来の微小変位計に比べて、使用コストも低く、装置自体も小型・軽量になり、分解能も数十ナノメートルと高く、測定誤差も小さい装置の開発に成功した。今後の目標は、測定速度や精度を向上させるためにマイコンを用いて測定の自動化を行い、1/2 波長以上の変位を測定するためにピーク数を数えるカウンタを作製することである。

参考文献

- 1) 坂本明紀, 津田紀生, 山田諄: 「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」, 電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459(2006.12)
- 2) 名和靖彦, 津田紀生, 山田諄: 「自己結合効果を用いた微小振動の自動測定」, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.12, pp.2115-2120(2009.12)